

Tomasz Moczadłowski¹, Antoni Grzanka^{1,2}, Zygmunt Pawłowski³

¹ Instytut Systemów Elektronicznych Politechniki Warszawskiej

² Instytut Fizjologii i Patologii Słuchu, Warszawa

³ Katedra Foniatrii Akademii Muzycznej, Warszawa

Przegląd metod wizualizacji drgań fałdów głosowych

The Review of Methods for Visualization of Vocal Folds Vibration

Słowa kluczowe: laryngoskopia, laryngostroboskopia, videokymografia, fotoglotografia, elektrolaryngografia, elektroglotografia, ultrasonoglotografia.

Key words: laryngoscopy, laryngostroboscopy, videokymography, photoglottography, electrolaryngography, electroglottography, ultrasonoglottography.

Streszczenie

W pracy przedstawiono przegląd metod wizualizacji drgań strun głosowych, dzieląc te metody według medium fizycznego penetrującego obszar głośni podczas badania. Opiszano metody optyczne (laryngoskopia, laryngostroboskopia, videokymografia, fotoglotografia, elektrolaryngografia), elektryczne (elektroglotografia) i akustyczne (ultrasonoglotografia).

Summary

A review of various methods for visualization of vocal folds has been presented in the paper in groups divided on the physical media crossing the glottis during the investigation. The following groups of methods have been described – optical methods (laryngoscopy, laryngostroboscopy, videokymography, photoglottography, electrolaryngography), an electrical method (electroglottography) and an acoustic method (ultrasonoglottography).

Badania drgań fałdów głosowych przeprowadza się w celu oceny fonacyjnej czynności krtani w warunkach fizjologicznych oraz patologicznych, w tym przy zaburzeniach u osób z grup zawodowych, takich jak wokaliści, pedagodzy, aktorzy, prawnicy. Wybór odpowiedniej metody obrazowania drgań fałdów głosowych zależy od tego, jakie informacje o drganiach chcemy uzyskać. Różne metody niejednakowo dokładnie i użytecznie opisują sam ruch bądź jego określone fazy. Istnieje też wybór pomiędzy pomiarem sygnału pochodzącego od każdego z fałdów z osobna lub wypadkowego z obu fałdów. Najprostsze wzrokowe laryngologiczne metody badania krtani, takie jak laryngoskopia pośrednia (oglądanie krtani za pośrednictwem usytuowanego w gardle małego, skierowanego pod kątem w dół lusterka), laryngoskopia sztywna, elastyczna i bezpośrednia (o nich dalej), nie mogą być tu zastosowane ze względu na zbyt szybki ruch fałdów głosowych, nie do uchwycenia przez ludzki wzrok. Obraz uzyskany bardziej zaawansowanymi technikami musi być zapisany i odpowiednio przetworzony. Informacje o drganiach fałdów głosowych można też uzyskać na podstawie innych właściwości tkanek ludzkich w obecności powietrza, jak ich impedancja elektryczna, przepuszczalność i odbicie ultradźwięków. Metody wizualizacji można podzielić ze względu na wielkość fizyczną penetrującą badane tkanki i tak zostaną one przedstawione.

Przebieg drgań fałdów głosowych, czyli zmian obszaru głośni w czasie tych drgań to glogram. Korzystając z **glogramu**, często oblicza się parametry cyklu drgań, takie jak **wskaźnik otwarcia** (*open quotient* – stosunek czasu otwarcia głośni do całego okresu drgań) i **wskaźnik szybkości** (*speed quotient* – stosunek czasu otwierania się głośni do czasu zamykania).

LARYNGOSKOPIA (ENDOSKOPIA) SZTYWNA, ELASTYCZNA I BEZPOŚREDNIA

Badanie **sztywnym teleskopem / endoskopem lupowym** (różne nazewnictwo) polega na umieszczeniu końcówki instrumentu w tyle gardła. Pryzmat znajdujący się na końcówce pozwala przekazać obraz z powierzchni krtani. Obraz ten jest wysoce przejrzysty, jednak umieszczenie przedmiotu głęboko w gardle może wywoływać odruchy wymiotne. Badanie możliwe jest jedynie przy wymawianiu samogłosek, ponieważ tylko wówczas jama ustna jest przez cały czas rozwarta.

Drugim, bardziej inwazyjnym, urządzeniem jest **laryngofiberoskop (endoskop elastyczny)**. Elastyczną wiązkę światłowodową wprowadza się przez nos i jamę nosową na wysokość wejścia do krtani, ewentualnie wcześniej, lekko znieczulając drogi nosowe. Ten sposób jest o wiele wygodniejszy dla badanego i umożliwia przeprowadzenie badania w czasie normalnej mowy lub śpiewu, jednak

rozdzielczość obrazu jest gorsza. Ponadto badanie teleskopem sztywnym jest lepsze przy ocenie uszkodzeń fałdów głosowych. Obie techniki uzupełniają się i są często stosowane.

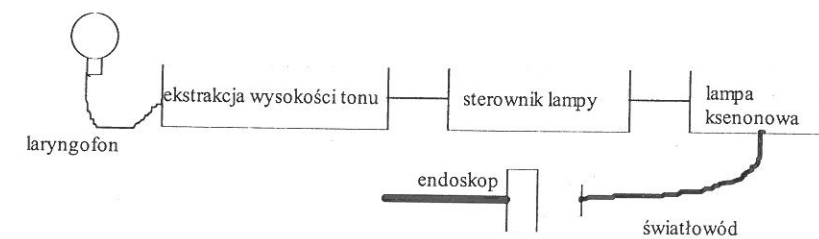
Do wyjść obu urządzeń podłącza się urządzenie zapisujące i wzornik dla operatora umożliwiający kontrolę wprowadzenia końcówki.

Laryngoskopia bezpośrednia polega na bezpośrednim oglądaniu krtani. Ze względu na swą wielką inwazyjność z reguły przeprowadzana jest przy całkowitym znieczuleniu, najczęściej w czasie operacji.

I. METODY OPTYCZNE

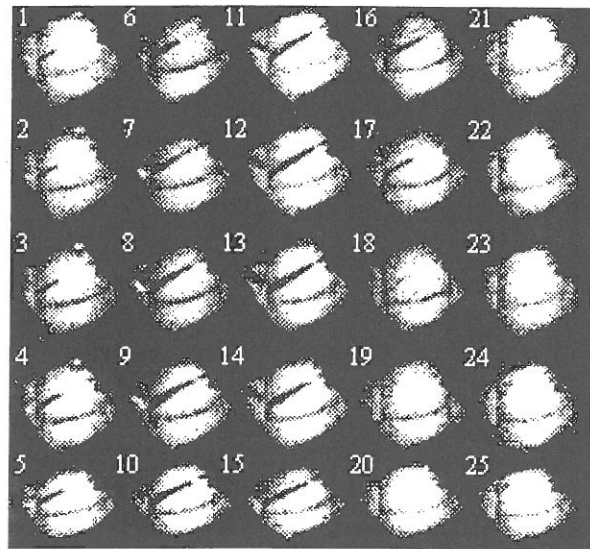
1. Laryngostroboskopia (videostroboskopia)

Zjawisko stroboskopowe polega na okresowym próbkowaniu ruchu powtarzalnego. Stroboskopowe źródło światła emituje bardzo jasne i bardzo krótkie błyski w równych odstępach czasu. Jeśli struny głosowe drgają okresowo i jeśli częstotliwość oświetlających je błysków jest równa podwielokrotności częstotliwości tych drgań ($1/n \cdot F_0$), to zaobserwujemy zamrożoną w czasie fazę ruchu. Jeśli jednak błyski powtarzają się trochę częściej lub rzadziej niż wielokrotność okresu drgań, to zaobserwujemy spowolniony ruch w przód lub w tył. W ten sposób można obejrzeć jedynie widzianą z góry powierzchnię drgających o k r e s o w o fałdów głosowych. Doboru odpowiednich częstotliwości drgań fałdów głosowych i błysków można dokonać na dwa sposoby. Pierwszy polega na dostosowaniu przez badanego tonu do dźwięku z generatora. Jeśli badany nie jest muzykalny lub nie potrafi utrzymać wysokości tonu, na szyi umieszcza się mikrofon lub laryngofon podłączony do układu określającego częstotliwość podstawową tonu i sterującego stroboskopem.



Ryc. 1. Sposób sterowania stroboskopem

W badaniu wykorzystuje się lusterko krtaniowe, endoskop sztywny lub elastyczny. Wiązka światłowodowa lub inny światłoprzewodzący element przesyła światło ze stroboskopu do krtani. Obraz na wyjściu endoskopu może być zapisany przez kamerę CCD (ruch zapisany jako sekwencja obrazów cyfrowych), kamerę video lub zwykłą kamerę filmową. Następnie można przeprowadzić poklatkową analizę obrazu i w ten sposób uzyskać przebiegi, np. powierzchni i długości głośni, odchylenia od środka prawego i lewego fałdu głosowego. Analiza taka jest możliwa dzięki kontrastowi między powierzchnią fałdów głosowych i otaczających je tkanek a obszarem głośni (światło jest pochłaniane przez głośnie, a odbija się od powierzchni tkanek krtani). Na ryc. 2 przedstawiono obrazy uzyskane przez badanie stroboskopowe.

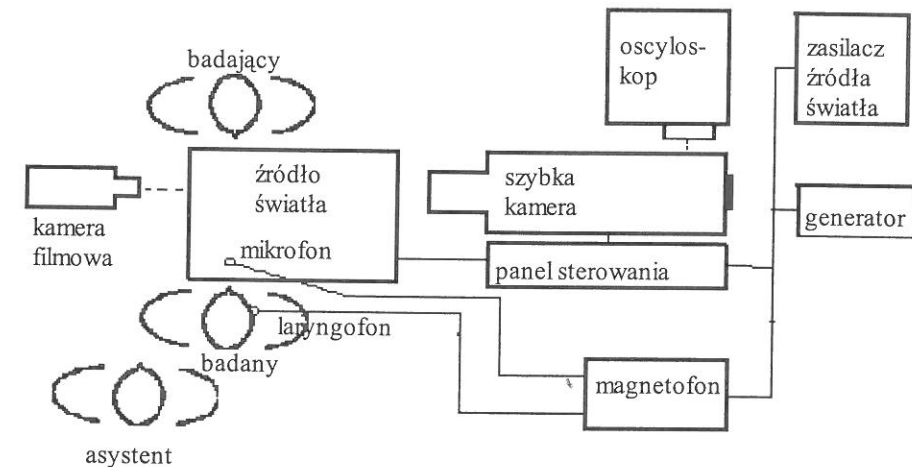


Ryc. 2. Sekwencja obrazów stroboskopowych drgających fałdów głosowych – 1-9: faza otwierania; 10-18: faza zamykania; 19-25: zamknięcie [według: Saito 1978]

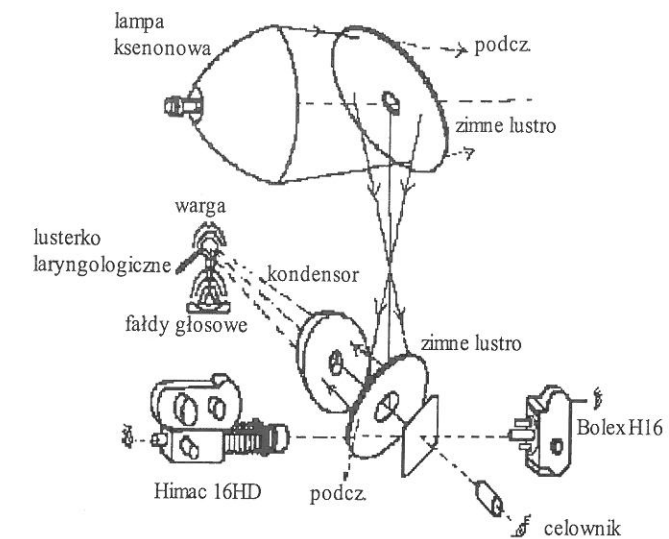
2. Szybkie filmowanie

Filmowanie szybką kamerą pozwala zaobserwować również nieokresowe, niesymetryczne i bardzo krótkie drgania strun głosowych oraz analizować z osobna każdy okres drgań. Na ryc. 3 i 4 pokazany jest schemat aparatu z 1971 r., skonstruowany na uniwersytecie w Kurume w Japonii [Hirano 1974]. Szybka kamera zapisuje do 10 000 klatek/s. Ze względu na konieczność intensywnego oświetlenia krtani układ optyczny takiego aparatu musi zapewnić odprowadzenie promieniowa-

nia ciepłego (podczerwonego) z wiązki światła. Źródło światła o dużej mocy musi być włączone w pełnym czasie filmowania, a nie – jak w przypadku stroboskopii – tylko na chwilę próbkowania. Dzięki zimnym lustrum promieniowanie termiczne jest zmniejszone do 1%.

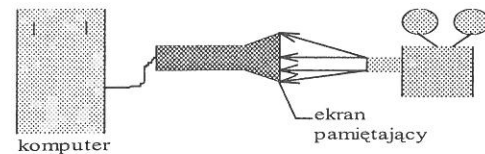


Ryc. 3. Schemat systemu do szybkiego filmowania [według: Hirano 1974]



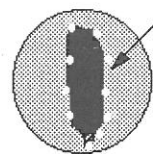
Ryc. 4. Schemat układu optycznego i fotograficznego [według: Hirano 1974]

Poklatkowa analiza filmu przeprowadzana była po cyfrowym zapisie obrazu. Film był wyświetlany na płaskim ekranie pamiętającym, stamtąd zbierany i przetwarzany na postać cyfrową.



Ryc. 5. Przetwarzanie obrazów filmowych

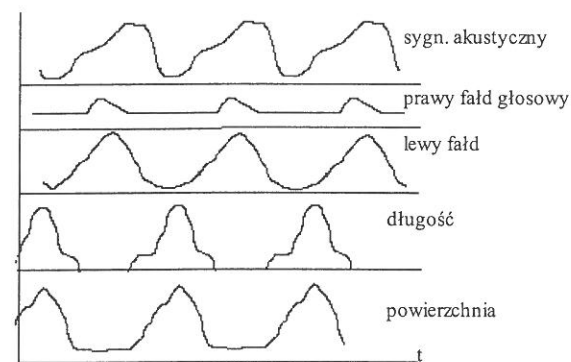
Sposoby analizy mogą być podobne dla różnych technik filmowania (szybkie, stroboskopowe). Dzięki kontrastowi między powierzchnią głośni a tkankami krtani można automatycznie obliczać takie parametry, jak powierzchnia głośni, jej długość, szerokość i inne. Proces określenia granic głośni może być kontrolowany ręcznie poprzez wybranie punktów na obrzeżu badanego obszaru, a program notuje współrzędne i oblicza zakreśloną powierzchnię. Przykładowy algorytm obliczania powierzchni głośni wygląda następująco [Hayden 1972]:



głośnia z zaznaczonymi punktami

Dla 10 punktów wybieranych jest 8 trójkątów;
pole trójkąta określone przez 3 punkty:

$$S_i = 1/2 \begin{vmatrix} x_1 & y_1 & 1 \\ x_2 & y_2 & 1 \\ x_3 & y_3 & 1 \end{vmatrix} \quad \text{Cała powierzchnia:} \\ S = \sum S_i$$



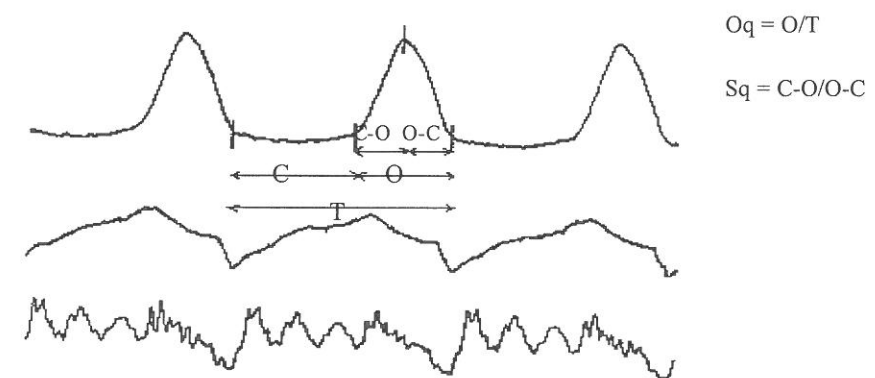
Ryc. 6. Metoda i wyniki analizy poklatkowej filmu (przypadek raka prawego fałdu głosowego)

3. Videokymografia (VKG)

Jest to również technika szybkiego filmowania, z tym że filmowana (skanowana) jest tylko jedna linia (wąski pasek) badanego obiektu [www: Kay]. Migawka kamery jest wąską szczeliną. Obraz nie jest tak przejrzysty w oglądaniu, jak przy pełnej klatce, ponieważ mamy do dyspozycji tylko jedną linię z danej chwili. Endoskop ustawiony jest w pozycji, która odpowiada badanemu fragmentowi strun głosowych (środek, brzegi itd.). Obraz jest zapisywany na taśmie magnetowidowej. Sprzęt do VKG produkowany przez firmę Kay Electronics umożliwia pracę w trybie szybkim lub standardowym. Tryb standardowy daje pełny obraz czarno-biały video z częstotliwością ramki 60 Hz (NTSC) lub 50 Hz (PAL). W trybie szybkim kamera skanuje linię z prędkością 8000 linii/s. Każda linia jest wyświetlana kolejno na monitorze jedna pod drugą. Dodatkowo możliwe jest przełączanie pomiędzy kamerą VKG a kolorową kamerą do stroboskopii.

4. Fotoglografia (FGG/ PGG)

Metoda opiera się na zjawisku zależności prądu fotoelementu (np. fototranzystora) od natężenia padającego nań światła [Kitzing 1979; Pawłowski 1971]. Powierzchnia głośni może być oświetlona od góry lub od dołu. W pierwszym przypadku na fotoelement pada skierowane przez układ optyczny światło odbite. Natężenie tego światła jest tym większe, im mniejsza powierzchnia głośni, ponieważ światło odbija się od powierzchni fałdów głosowych, a pochłaniane jest przez ścianę tchawicy.



Ryc. 7. Fotoglottogram, elektrogłottogram i sygnał akustyczny z zaznaczeniem poszczególnych faz i definicje parametrów opisujących przebiegi

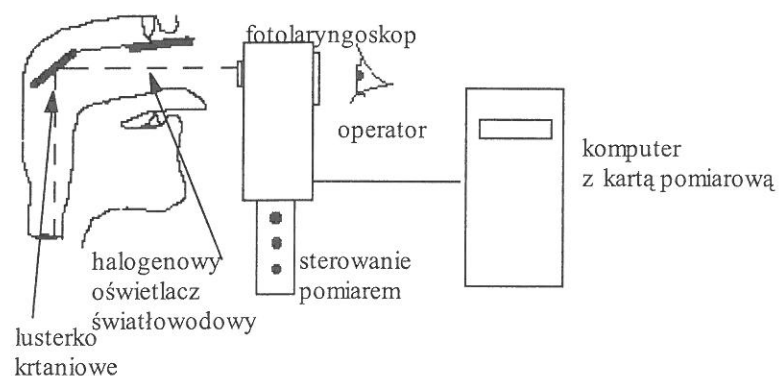
W drugim przypadku światło wchodzi w przestrzeń podgłośniową przez tkanki miękkie szyi. Natężenie światła padającego na fotoelement jest tym razem większe przy większej powierzchni głośni. Wówczas przeszkoda (w postaci fałdów głosowych) na drodze promieni jest mniejsza. Różnica natężenia światła powoduje zmiany prądu fototranzystora. Wzmocniony sygnał jest odpowiednikiem ruchu fałdów głosowych. Urządzenie zwane jest fotolaryngoskopem lub fotoglotografem.

Fotoelement wprowadza się do krtani za pomocą endoskopu elastycznego lub sztywnego albo w sposób opisany dalej przy fotolaryngoskopie laserowym.

Fotoglotografia ma przewagę nad innymi metodami przy opisie fazy otwarcia fałdów głosowych.

5. Fotolaryngoskopia laserowa

Metoda ta została opracowana w Polsce w latach 1958-1994 przez prof. Z. Pawłowskiego i wdrożona do praktyki klinicznej przy współpracy wielu ośrodków naukowych, m.in. Katedry Foniatrii Akademii Muzycznej w Warszawie, Politechniki Warszawskiej, Instytutu Biocybernetyki oraz Inżynierii Biomedycznej PAN, Fabryki Narzędzi Chirurgicznych w Milanówku. W tym czasie powstało kilka prototypów fotolaryngoskopu chronionych patentami [Sposób 1992]. Efektem wieloletnich prac konstrukcyjnych, doświadczalnych i klinicznych jest fotolaryngoskop laserowy nowej generacji.



Ryc. 8. Fotolaryngoskop laserowy

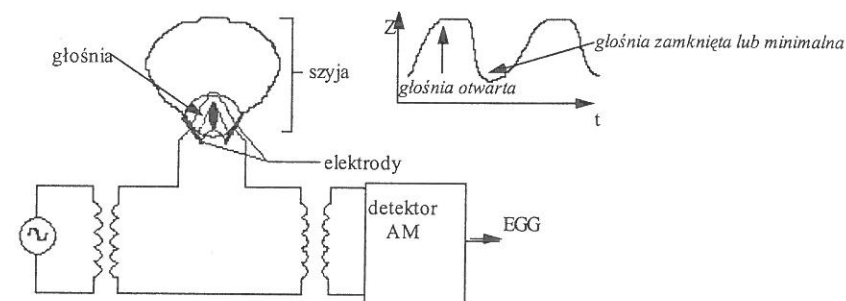
Zasada działania pozostaje ta sama, co w przypadku zwykłego fotolaryngoskopu z oświetleniem głośni od góry. Różnica polega na wykorzystaniu jako źródła światła wąskiego promienia lasera o znacznie większej gęstości energii niż zwykle źródło światła, co pozwala na precyzyjne pomiary drgań każdego fałdu głosowego z osobna.

Przystępując do badania, osoba wykonująca badanie oświetla wybrany obszar strun głosowych lusterkiem krtaniowym połączonym z oświetlaczem halogenowym. Układ celownika ułatwia wybór miejsca. Dla badającego jest to migająca, kolorowa plamka na tle strun głosowych, obserwowana w okularze fotolaryngoskopu przez lusterko wykorzystywane do ich oświetlenia. Położenie tej plamki odpowiada miejscu, na które pada pomiarowy strumień światła. Po wyznaczeniu miejsca pomiaru operator naciska jeden z przycisków sterowania, aby przez układ pomiarowy dokonać optymalnego wzmocnienia sygnału (zmodulowanego światła podczerwonego odbitego od strun głosowych). Naciśnięcie przycisku pomiaru rozpoczyna właściwą rejestrację przez wybrany wcześniej okres. Odbierany przez fotodetektor zmodulowany sygnał świetlny, odbity od drgających strun głosowych, jest przetwarzany przez układ elektroniczny na sygnał elektryczny, który przetworzony na postać cyfrową za pomocą karty pomiarowej w komputerze zapisywany jest w pamięci.

II. METODY ELEKTRYCZNE

Elektroglotografia (EGG)

Badanie EGG polega na przepuszczeniu przez szyję w okolicach krtani prądu wysokiej częstotliwości i rejestracji zmian impedancji szyi w czasie drgań fałdów głosowych [www: Sprachverarbeitung]. W chwili rozwarcia fałdów głosowych opór tkanek jest duży, natomiast podczas zwarcia maleje. Opór zależy więc od wielkości przestrzeni wypełnionej powietrzem (wielkości głośni). Sygnał sinusoidalny, o częstotliwości zwykle z zakresu od 300 kHz do 5 MHz, jest wysyłany za pomocą elektrod umieszczonych po obu stronach okolicy chrząstki tarczowatej. Napięcie i natężenie jest małe, fizjologicznie bezpieczne. Na ryc. 9 przedstawiono konfigurację urządzenia. Pierwszy elektroglotograf został skonstruowany przez Fabre w 1957 r.



Ryc. 9. Zasada pomiaru EGG

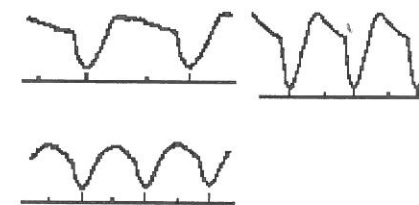
Elektrody wykonywane są z miedzi, srebra lub są pozłacane. Mają kształt pierścienia bądź prostokąta o powierzchni 3-9 cm². Często używa się trzeciej elektrody jako punktu odniesienia w pomiarze impedancji. Może to być osobna blaszka lub pierścień otaczający każdą z pozostałych elektrod. Elektrody mocuje się na elastycznym pasku długości dobranej tak, by badany mógł swobodnie mówić lub śpiewać, a elektrody pozostawały w stabilnej pozycji. Częstotliwość sygnału jest na tyle wysoka, że prąd pojemnościowo przenika przez mniej przewodzącą warstwę skóry bez potrzeby stosowania pasty przewodzącej. Generator może być źródłem napięciowym lub prądowym. W przypadku źródła prądowego prąd jest nie większy niż kilka mA. Typowa wartość napięcia między elektrodami to ok. 0,5 V. Głębokość modulacji AM odzwierciedla stopień zmian impedancji tkanek. Odebrany sygnał po zdemodulowaniu jest przetworzony A/C i gromadzony w pamięci komputera. Szybkie zmiany przewodności wywołane są głównie przez ruch fałdów głosowych. Gdy są rozwarte, impedancja między elektrodami jest duża, ponieważ impedancja powietrza jest o wiele większa niż impedancja tkanek. Jej spadek przy maksymalnym kontakcie jest rzędu 1-2% całkowitej impedancji krtani. Amplituda otrzymanego sygnału zależy ponadto od:

- położenia elektrod,
- kontaktu elektrycznego między elektrodami a skórą i jego zmian,
- pozycji krtani i strun głosowych w gardle,
- struktury chrząstki tarczowatej,
- ilości i proporcji tkanek mięśniowej, włóknistej i tłuszczowej wokół krtani,
- odległości między elektrodami.

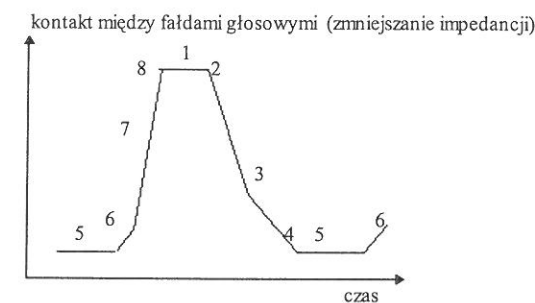
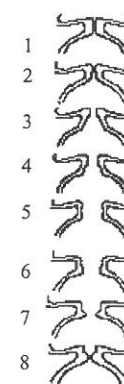
Może się zdarzyć, że zmiany impedancji spowodowane ruchami strun są zbyt słabe do zarejestrowania. Należy też zaznaczyć, że sygnały EGG zadawalającej jakości trudniej uzyskać u kobiet i u dzieci niż u mężczyzn. Jest to związane z mniejszą masą fałdów głosowych, większym kątem chrząstki tarczowatej i innymi proporcjami między różnymi typami tkanek, co pokazali Colton i Conture w 1990 r. Przykładowe krzywe uzyskane przez badanie EGG pokazane są na ryc. 10.

Integralną częścią elektroglogramu jest składnik pochodzący od pionowego ruchu całej krtani. Ruch taki zachodzi np. przy zmianie wysokości tonu (w czasie mowy przy różnej intonacji). Dlatego też sygnał od szybkich ruchów fałdów głosowych jest nałożony na sygnał pochodzący od wolniejszych ruchów innych struktur. Fourcin i Abberton [1977] zaproponowali oznaczenia Gx dla składowej od ruchów krtani i Lx dla składowej wibracyjnej. Składowa stała i wolnozmienna Gx może być wyeliminowana przez zastosowanie dodatkowych elektrod kompensujących lub filtru górnoprzepustowego, jakkolwiek ten ostatni sposób może wprowadzać zniekształcenia, tłumiąc sygnał Lx o niższych częstotliwościach.

Należałoby też stosować filtry SOI (o skończonej odpowiedzi impulsowej) w celu utrzymania liniowej fazy. Trzeba również zauważyć, że nawet niefiltrowany sygnał EGG nie jest wolny od zniekształceń, szczególnie ze względu na charakterystykę częstotliwościową obwodu detektora, która może wpływać na odpowiedź częstotliwościową urządzenia, zwłaszcza w zakresie niskich częstotliwości, oraz szumy. Wiele dostępnych w handlu urządzeń zawiera automatyczną regulację wzmocnienia służącą do kompensacji zmian poziomu sygnału wynikających ze zmiennej impedancji krtani. Układy takie odpowiadają z małym opóźnieniem. Stała czasowa urządzenia również może wpływać na przebieg EGG przy niskich częstotliwościach. Układ taki jest jednak bardzo pomocny w eliminacji zmiennego kontaktu skóra-elektroda. Innym sposobem eliminacji zakłóceń są specjalne algorytmy stosowane do obliczania konkretnych parametrów w niefiltrowanym sygnale. Kształt elektroglogramu odzwierciedla powierzchnię głośni. Na ryc. 11 pokazano związek między uproszczonym przebiegiem a fazami cyklu wibracyjnego w przypadku fonacji z pełnym zwarciem strun głosowych.



Ryc. 10. Przykłady różnych krzywych EGG (znaczniki pokazują wyznaczone stroboskopowo fazy maksymalnego otwarcia i zamknięcia)



Ryc. 11. Model przebiegu EGG i odpowiednie fazy cyklu ruchu fałdów głosowych

Pochodnej przebiegu względem czasu często używa się dla określenia okresowości sygnału. Może też być użyta do identyfikacji wyróżniających się zmian na zboczach w fazach wzrostu i spadku impedancji. Dodatni szczyt pochodnej służy do określenia chwili zwarcia. W ten sposób można zmierzyć F0 prościej i dokładniej niż w sygnale akustycznym. Ujemny szczyt pochodnej może określać punkt rozwarcia fałdów.

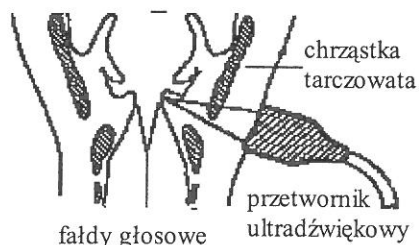
Elektroglotografia nie określa ruchów każdego fałdu z osobna, pozwala jednak, w porównaniu z innymi metodami, na lepszą reprezentację fazy zamykania i zamknięcia fałdów głosowych, szczególnie w pionie. Ponadto jest to metoda zupełnie bezinwazyjna, wygodna dla badanego.

III. METODY AKUSTYCZNE

Ultrasonoglotografia

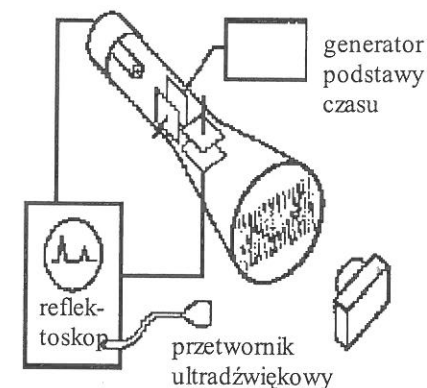
Metoda wykorzystuje ideę reflektoskopu ultradźwiękowego stosowanego do nie niszczącego testowania materiałów [Hertz 1970; Holmer 1975; Kaneko 1976]. Krótkie (rzędu $1 \mu s$) impulsy ultradźwiękowe generowane są przez elektrycznie pobudzony przetwornik, który styka się bezpośrednio z badanym materiałem. Dobry kontakt akustyczny jest zapewniony przez nałożoną warstwę oleju między przetwornikiem a powierzchnią materiału. Jeśli materiał zawiera jakieś bariery dla ultradźwięków, odbite impulsy (echo) osiągają przetwornik, który działa jednocześnie jako mikrofon. Opóźnienie między wysłanym a odebrany impuls mowi o odległości od odbijającej bariery.

Aby móc określić złożony ruch fałdów głosowych w płaszczyźnie pionowej, wiązka ultradźwiękowa musi być bardzo wąska. Ponadto ze względu na małą amplitudę drgań fałdów głosowych, aby uzyskać jak najlepszą rozdzielczość, przetwornik powinien pracować z jak największą częstotliwością. Z drugiej strony, przy dużych częstotliwościach zwiększa się absorpcja. Stosuje się częstotliwości rzędu 2-4 MHz.



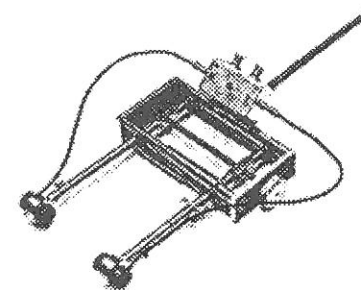
Ryc. 12. Pozycja przetwornika ultradźwiękowego

Zapis echa można zrealizować metodą czasowo-ruchową (*time-motion* – TM), stosowaną w echokardiografii. Ilustruje ją ryc. 13. Piłozębne napięcie z reflektoskopu odchyła strumień elektronów w ujemnym kierunku y dla każdego wysyłanego impulsu ultradźwiękowego. W tym samym czasie intensywność strumienia elektronów jest modulowana przez sygnał echa w ten sposób, że plamka na ekranie jest widoczna tylko wówczas, gdy odbierane jest echo. Metoda ta, opisana w pracach Herta [1970] i Holmera [1975], nie pozwala na bezpośredni zapis cyfrowy, więc współcześnie należałoby ją nieco zmodyfikować.



Ryc. 13. Zasada metody czasowo-ruchowej zapisu, w której przebieg drgających strun głosowych jest wyświetlany na ekranie lampy oscyloskopowej i fotografowany

Problemem jest właściwe umiejscowienie przetwornika. Należy dokładnie określić poziom strun głosowych. Jeszcze większym problemem jest odpowiednie skierowanie wiązki promieni w kierunku strun głosowych. Ułatwieniem jest zastosowanie dwóch przetworników umieszczonych na jednej osi po obu stronach szyi. Jeden przetwornik pracuje jako nadajnik, drugi jako odbiornik. Zamontowane są na mechanicznym uchwycie z regulacją odległości między przetwornikami, aby dostosować ją do różnych krtani.



Ryc. 14. Uchwyt z przetwornikami ultradźwiękowymi

Odebrany sygnał jest zmodulowanym amplitudowo przez krtań sygnałem wysłanym. Natężenie odebranych ultradźwięków maleje wraz z rozwieraniem fałdów głosowych. Właściwą pozycję przetworników określa się na podstawie kształtu przebiegu – maksymalnej amplitudy.

W czasie ciągłej mowy częstotliwość głosu zmienia się z intonacją. W tym samym czasie krtań stale porusza się w górę i w dół. Dlatego też dla raz dobranej pozycji przetworników musi być utrzymana ta sama wysokość tonu. To samo dotyczyło elektroglografii.

Przetwornik odbiorczy jest podłączony do wzmacniacza z demodulatorem i filtrem odcinającym sygnał o częstotliwościach wyższych niż częstotliwość próbkowania (powtarzania impulsów ultradźwiękowych).

Ultradźwiękowe badanie drgań strun głosowych daje ciągły obraz ruchu, jest nieinwazyjne, wygodne dla badanego. Przy pewnym rozwinięciu umożliwia określenie ruchów każdego fałdu z osobna. Ponadto, wykorzystując zjawisko Dopplera, można mierzyć prędkości ruchu fałdów.

IV. PODSUMOWANIE

Istnieje różnorodność technik rejestracji ruchu fałd głosowych. Metody optyczne dają bezpośredni wgląd w badaną strukturę, a więc są metodami wzorcowymi i dokładnymi. Niestety, ingerencja wziernika zmienia warunki badania, zaburza fonację i powoduje dyskomfort u badanego. Zakres dźwięków wykorzystanych w testach i czas badania są więc ograniczone. Metody te znajdują zastosowanie w badaniach diagnostycznych przed zabiegiem operacyjnym lub też w szczegółowych badaniach naukowych.

Metoda elektroglograficzna oparta na rejestracji zmian impedancji elektrycznej okolic krtani pozwala na ocenę stopnia otwarcia strun głosowych z zewnątrz bez ingerencji w górną część traktu głosowego. Natomiast problemem jest tu odpowiednie wyskalowanie aparatury. Metoda znajduje zastosowanie w badaniach współbieżności faz oddechowych i fonacji.

Podobne cechy ma metoda ultrasonograficzna. Jest bezinwazyjna i nie zakłóca procesu głosotwórczego, ale też jest trudna w kalibracji, choć w perspektywie można oczekiwać rozbudowania tej techniki o opcje pomiaru szybkości ruchu fałd z wykorzystaniem zjawiska Dopplera.

Bibliografia

- Basztura Cz., 1988: Źródła, sygnały i obrazy akustyczne. Warszawa.
Bresińska, 1966: Badania i modyfikacja automatycznego fotolaryngoskopu do analizy drgań strun

- głosowych. Praca dyplomowa. Politechnika Warszawska.
Foniatria kliniczna, 1992. Red. A. Pruszevicz. Warszawa: PZWL.
Hayden E. H., Koike Y., 1972: A data processing for frame by frame film analysis. „Folia Phoniatria” 24, 169-181.
Hertz C. H., Lindström K., Sonesson B., 1970: Ultrasonic recording of the vocal folds. A preliminary report. „Acta Otolaryngol.” 263, 56-59.
Hirano M. (i inni), 1976: An apparatus for ultra-high-speed cinematography of the vocal cords. „An. Otol., Rhinol. Laryngol.” 83, 12-18.
Holmer N. G., Kitzing P., 1975: Localization of the vocal folds and registration of their movements by ultrasound W: Ultrasonics in medicine. Amsterdam.
Kaneko T. (i inni), 1976: L'ultrasonographie; l'aire neutre glottique et la vibration de la corde vocale. „Rev. Laryngol. Otol. Rhinol.” 97, 363-368.
Kitzing P., Löfvist A., 1979: Evaluation of voice by means of photoglottography. „Folia Phoniatria” 31, 103-109.
Michel C. van, 1964: Etude par la methode electroglottographique des compartements glottiques de type phonatoire en dehors de toute emissions sonare. „Rev. Laryngol.” 85, 469-475.
Michel C. van, 1966: Mouvements glottiques phonatoires sans emissions sonare. Etude electroglottographique. „Folia Phoniatr.” 18, 1-8.
Pawłowski Z., 1970: Badania drgań fałdów głosowych metodą elektrolaryngograficzną. „Otolaryngol. Pol.” 24, 233-240.
Pawłowski Z., 1971: O zjawisku przedłużonej wibracji fałdów głosowych. „Archiwum Akustyki” 4, 6, 327-335.
Pedersen M. F., 1977: Electroglottography compared with synchronized stroboscopy in normal persons. „Folia Phoniatr.” 29, 191-199.
Saito Sh. (i inni), 1978: Stroboscopic observation of vocal fold vibration with fiberoptics. „Folia Phoniatr.” 30, 241-244.
Sonesson R., 1959: A method for studying the vibratory movements of the vocal cords. „J. Laryngol. Otol.” 73, 732-737.
Sposób rejestracji drgań strun głosowych i fotolaryngoskop do rejestracji strun głosowych. Patent RP nr 157480. Warszawa, 1992.
Svec J. G., Schutte H. R., 1996: Videokymography: high-speed line scanning of vocal fold vibration. „J. of Voice” 10, 201-205.
Vallencien B., Faulhaber J., 1967: What to think of glottography. „Folia Phoniatr.a” 19, 39-44.

Publikacje internetowe

- Institut für Maschinelle Sprachverarbeitung, Univ. Stuttgart**
<http://www.ims.uni-stuttgart.de/phonetik/EGG/>
The Voice Center at Western Virginia Medical School
<http://www.voice-center.com/larynx.html>
Biostat
<http://www.biostat.wisc.edu/otoweb/voice/bruce/stroboscopy.html>
Erlangen
<http://www.rrze.uni-erlangen.de/docs/fav/fakultaet/med/kli/kphno/phon/ppglote.htm>
Kay Elemetrics home page
<http://www.kayelemetrics.com>